

BOR KARBÜR TAKVİYELİ ALÜMİNYUM ESASLI KOMPOZİT MALZEMELERİN TUZLU ORTAMDA KOROZYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Kubilay KARACİF¹ (ORCID:0000-0001-7180-7897) *

Hasan KARABULUT² (ORCID: 0000-0002-3370-9994)

Ramazan ÇITAK³ (ORCID: 0000-0001-7899-8091)

¹*Metaller ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Hitit Üniversitesi, Çorum, Türkiye*

²*Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, TOBB Meslek Yüksekokulu, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye*

³*Metaller ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye*

Geliş / Received: 23.11.2018

Kabul / Accepted: 06.04.2019

ÖZ

Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemi kullanılarak elde edilen bor karbür (B₄C) takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin tuzlu ortamdaki korozyon davranışları incelenmiştir. Üretim esnasında, alüminyum ve bor karbür tozlarının homojen şekilde birbiri içerisinde dağılımını sağlamak için bir saat karıştırma veya farklı sürelerde mekanik alaşımlama işlemleri uygulanmıştır. Karıştırma veya farklı sürelerde uygulanan mekanik alaşımlama işlemleri sonrasında presleme ve sinterleme yapılarak elde edilen bor karbür takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelere %3,5'lük tuzlu su (NaCl) ortamında potansiyodinamik korozyon testleri uygulanmıştır. Elektrokimyasal korozyon testleri sonucunda mekanik alaşımlama süresinin artması ile malzemenin korozyon hızının arttığı, korozyon dayanımının azaldığı belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Alüminyum, bor karbür, toz metalurjisi, mekanik alaşımlama, korozyon

THE INVESTIGATION OF CORROSION BEHAVIOR OF ALUMINUM COMPOSITES REINFORCED WITH BORON CARBIDE IN SALTWATER MEDIUM

ABSTRACT

In the study, corrosion behaviors of powder metal aluminum composites reinforced with boron carbide (B₄C) were investigated in saltwater medium. For the production of composite specimens, one hour mixing or mechanical alloying for different durations was applied to ensure uniform distribution of aluminum and boron carbide powders. After pressing and sintering treatment of specimens, electrochemical corrosion tests were applied in 3.5% NaCl solution by potentiodynamic methods. According to electrochemical corrosion test results, it was determined that the corrosion rate of material was increased and corrosion resistance decreased with the increase of mechanical alloying duration.

Keywords: Aluminum, boron carbide, powder metallurgy, mechanical alloying, corrosion

*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.:0 505 7240414; e-mail: kubilaykaracif@hitit.edu.tr

1. GİRİŞ

Alüminyum hafiflik, iyi iletkenlik, yüksek plastik deformasyon kabiliyeti, üstün korozyon dayanımı gibi avantajlı özelliklere sahip olan bir metaldir. Fakat ticari saflıkta alüminyum ve birçok alüminyum alaşımı dayanım, sertlik, aşınma dayanımı gibi bazı mekanik özellikler açısından dezavantajlı konumdadır. Alüminyum metalinin bu dezavantajını gidermek, sahip olduğu üstün özellikler yanında mekanik özellikleri de geliştirmek için ana malzemeye dayanımı artırıcı takviye malzemelerini makro düzeyde ilave ederek kompozit malzeme haline getirmek iyi bir yöntemdir. Bu şekilde üretilen alüminyum esaslı kompozit malzemeler, hem hafifliği hem de iyi mekanik özellikler göstermesi nedeniyle birçok alan kullanılmaktadır [1-7].

Alüminyum esaslı kompozit malzemelerde dayanım artırıcı takviye malzemeleri olarak genellikle silisyum karbür (SiC), alumina (Al₂O₃) ve bor karbür (B₄C) kullanılmaktadır. Bu takviye elemanları içerisinde bor karbür, hafiflik, yüksek mekanik özellikler, yüksek ergime sıcaklığı gibi üstün özelliklere sahip olup tercih edilmektedir [8-10].

Toz metalurjisi ile malzeme üretiminde, karıştırma (KR) veya mekanik alaşımlama (MA) işlemi ana malzeme tozları ile takviye malzeme tozlarının homojen olarak birbirine karışması, toz boyutlarının istenilen seviyelere getirilmesi amacıyla yapılmaktadır. MA işleminde uygulanan süreye göre tozların özellikleri, buna bağlı olarak da presleme ve sinterleme sonrası elde edilen kompozit malzemenin yapısal özelliklerinin değişimi ile malzemenin mekanik özellikleri ve diğer özellikleri değişmektedir. Özelliklerin oluşmasında KR veya MA süresi çok önemlidir. MA süresinin optimum süreden az veya fazla olması malzeme yapısında ve bunun sonucunda malzeme özelliklerinde olumsuz etkiler ortaya çıkarmaktadır [11].

Alüminyumun, alüminyum alaşımlarının ve alüminyum esaslı kompozitlerin korozyon davranışında metal yüzeyinde oluşan pasif oksit filmi önemli rol oynamaktadır. Sürekli ve metal yüzeyine iyi yapışmış, gözeneksiz, sıkı, ince pasif film, korozyona karşı oldukça yüksek dayanım sağlamaktadır. Fakat gerek alüminyum alaşımlarında gerekse takviye malzeme ile güçlendirilmiş alüminyum esaslı kompozitlerde özellikle de klorürlü ortamlardaki korozyona karşı hassasiyet artmaktadır. Ortamda bulunan klor iyonları pasif oksit filmine karşı çok saldırgan davranış göstermekte, pasif filmin bozunmasına ve süreksizliğine neden olmaktadır. Bu şartlarda alüminyum esaslı kompozit malzemelerde bölgesel korozyon, çukur korozyonu veya takviye ile matris malzemesi arasında galvanik korozyon oluşmaktadır [11-17].

Bor karbür takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerde korozyon dayanımı alüminyuma göre daha düşük olmaktadır. Kompozit malzemedeki bor karbür oranı arttıkça kompozitin korozyon hızı da artmaktadır. Bu artış, matristeki bor karbür takviye elemanının yüzeydeki pasif oksit filmine zarar vermesine atfedilmektedir. Buna ilave olarak alüminyum matris ile bor karbür arayüzeyinde oluşan bazı intermetalik fazlar, alüminyum matrisin çözünmesini hızlandırmaktadır. Ayrıca, yapıda bulunan bor karbür partiküller de alüminyum matris ile galvanik çiftler oluşturarak matrisin çözünmesini hızlandırabilmektedirler [10, 18-20].

Bor karbür takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin korozyon davranışı ile ilgili çalışmalar bulunmakla birlikte, mekanik alaşımlama süresinin korozyon davranışına etkileri ile ilgili çalışma çok az sayıdadır. Mevcut çalışmalar genellikle MA süresinin kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerine etkileri ile ilgilidir. Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi ile üretilen, üretim esnasında ana malzeme ve takviye malzemesi tozlarına 1 saat KR veya 2, 4, 6, 8 ve 10 saat gibi farklı MA süreleri uygulanmış, %10 bor karbür takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin %3,5 NaCl ortamındaki elektrokimyasal korozyon davranışları potansiyodinamik yöntem kullanılarak incelenmiştir. Genel olarak literatürde B₄C takviyeli kompozitler için yapılan çalışmalarda takviye oranları ağırlıkça ya da hacimce %0-20 aralığındadır [21-23]. Bu nedenle toz metalurjisi yöntemi ile üretilen, alüminyum esaslı kompozit malzemelere ilave edilecek bor karbür takviye oranı ortalama bir değer olarak ağırlıkça %10 olarak belirlenmiştir. Çalışmanın esası, B₄C takviye malzemesi oranını sabit tutarak, üretim esnasında matris ve takviye malzemesi tozlarına uygulanan KR/MA süresinin NaCl ortamında alüminyum esaslı kompozit malzemenin korozyon davranışına etkilerini incelemektir.

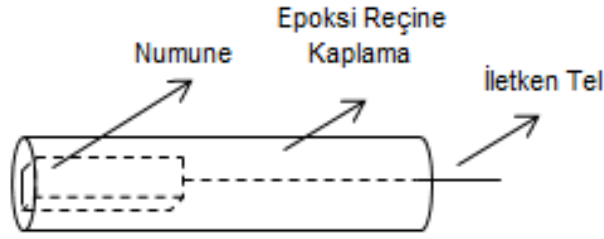
2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada numune olarak toz metalurjisi yöntemiyle üretilen bor karbür takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemeler kullanılmıştır. Kompozit numuneler hazırlanırken alüminyum tozları ve %10 oranında bor karbür tozları 1 saat KR veya 2, 4, 6, 8 ve 10 saat gibi farklı sürelerde MA işlemlerine tabi tutulmuşlardır. Takviye ve ana malzeme tozlarının KR işlemi bilyesiz olarak yapılırken, tozların MA işleminde çelik bilyeler kullanılmıştır. Tozların homojen şekilde karışımının sağlanması amacıyla yapılan bu işlem sonrasında, alüminyum matris ve bor karbür takviye malzemesi karışımına 700 MPa basınç altında presleme ve 600 °C sıcaklıkta argon atmosferi altında sinterleme işlemi yapılarak blok numuneler elde edilmiştir. Numunelerin toz metalurjisi üretim parametreleri Tablo 1'de verilmektedir.

BOR KARBÜR TAKVİYELİ ALUMİNYUM ESASLI KOMPOZİT MALZEMELERİN TUZLU ORTAMDA KOROZYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**Tablo 1.** Al-%10 B₄C kompozit numune üretim parametreleri

Malzeme Bileşimi	KR/MA Süreleri	Presleme Basıncı	Sinterleme Sıcaklığı ve Ortamı
Al+ %10 B ₄ C	1, 2, 4, 6, 8, 10 saat	700 MPa	600 °C Argon

Elektrokimyasal korozyon testleri için numunelerin yaklaşık 1 cm² alanındaki yüzeyi açıkta kalacak şekilde diğer yüzeyleri epoksi reçine ile soğuk kalıplama yapılarak çalışma elektrotu hazırlanmıştır. Korozyon testleri açıkta kalan bu 1 cm² alanındaki yüzeye uygulanmıştır. Kalıplama öncesinde numunenin potansiyostat/galvanostat cihazı ile bağlantısını sağlayacak iletken bir tel epoksi kalıplama öncesi numuneye eklenmiştir (Şekil 1).

**Şekil 1.** Al-%10 B₄C kompozit çalışma elektrotu

Elektrokimyasal korozyon testlerinde 100 mL hacimde camdan yapılmış üç boyunlu korozyon hücresi kullanılmıştır. Korozyon hücresinde elektrotlardan birisi alüminyum esaslı bor karbür takviyeli kompozit çalışma elektrotu, diğeri soy bir metal olan platinden hazırlanan karşı elektrot ve üçüncüsü de referans elektrot olan standart kalomel elektrottur. Çalışma elektrotu olan kompozit numuneler korozyon hücresinin anodu iken karşı elektrot olan platin ise korozyon hücresinin katodu durumundadır. Ivium marka potansiyostat/galvanostat cihazının kullanıldığı deneysel çalışmalarda, korozif ortam olarak %3,5 NaCl çözeltisi kullanılmıştır. Elektrokimyasal korozyon deney düzeneği Şekil 2’ de görülmektedir.

**Şekil 2.** Elektrokimyasal korozyon deneyi düzeneği.

K. KARACİF, H. KARABULUT, R. ÇITAK

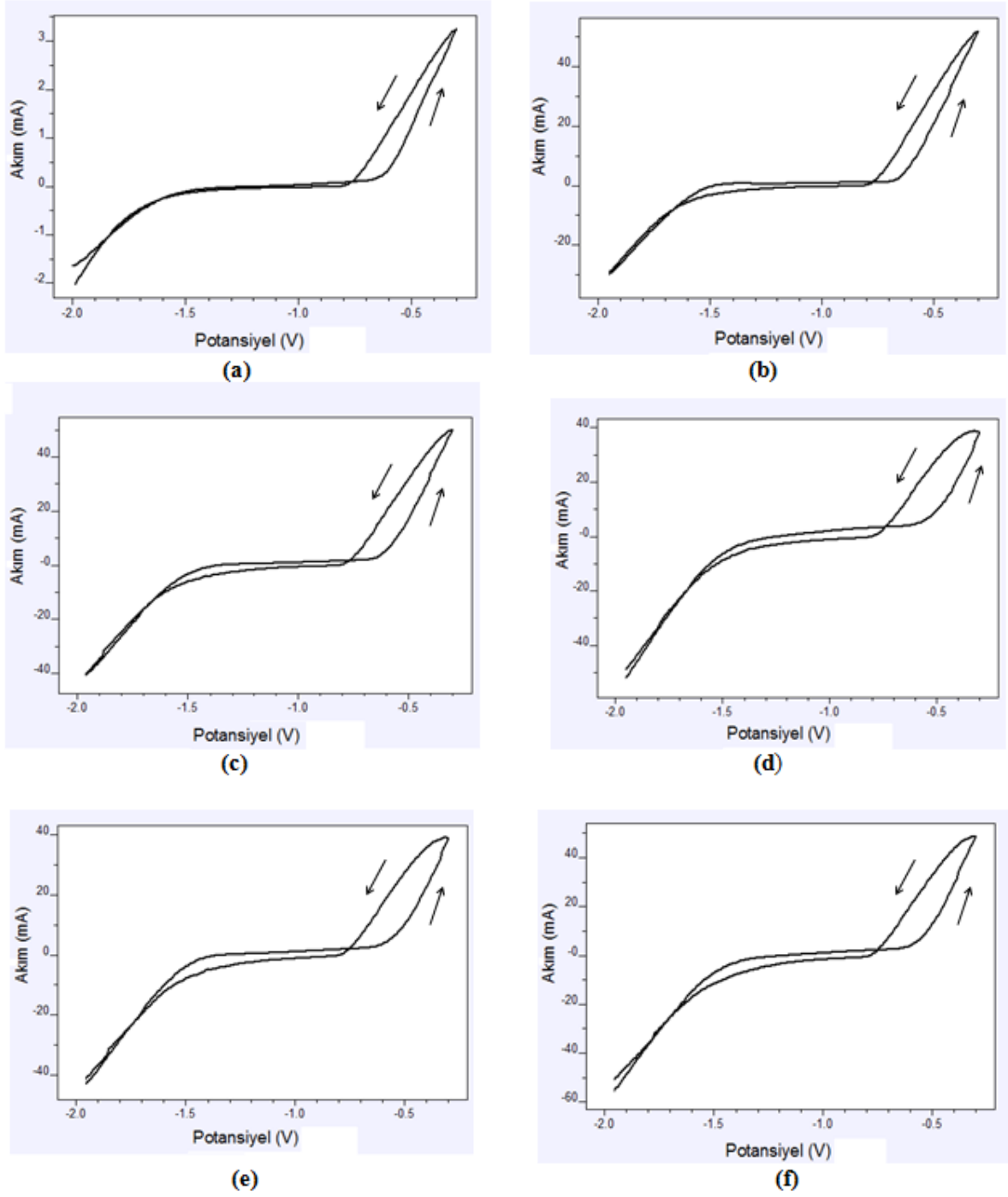
Potansiyodinamik yöntemin kullanıldığı elektrokimyasal korozyon testlerinde 220, 600, 800 ve en son 1200 numaralı zımpara ile yüzeyi temizlenen numunelere katodik yönden anodik yöne doğru geniş ve dar olmak üzere iki farklı aralıkta potansiyel uygulaması yapılarak akımdaki değişim izlenmiştir. İlk önce -2000 mV ile -300 mV arasında 50 mV/s tarama hızında potansiyel uygulaması ile potansiyodinamik polarizasyon eğrileri elde edilerek numunelerin genel korozyon davranışları incelenmiştir. Bu genel potansiyel taraması literatürdeki çalışmalarda olduğu gibi yüksek tarama hızında uygulanmıştır. Burada amaç korozyon hızını belirlemek olmayıp, numunelerin katodik ve anodik davranış gösterdikleri potansiyel aralıklarını görmek ve Tafel polarizasyonu için uygun potansiyel aralığını belirlemektir. İlk potansiyel taraması sonrasında uygulanan potansiyelin etkisi ile bozulan yüzey tekrar 1200 nolu zımpara temizlenerek orijinal haline getirilmiş, tüm elektrokimyasal ölçümler öncesi bu işlem tekrarlanmıştır. İkinci aşamada yüzeyleri zımpara ile temizlenen numunelere -1400 mV ile -600 mV arasında daha dar bir aralıkta 2 mV/s tarama hızında potansiyel uygulanarak Tafel polarizasyon eğrileri (potansiyel- log akım) elde edilmiştir. Tafel polarizasyonu için yapılan potansiyel taramaları literatüre uygun olarak çok yavaş hızlarda yapılmıştır [8, 13]. Elde edilen Tafel polarizasyon eğrilerinden numunelerin korozyon potansiyelleri, korozyon akımları ve korozyon hızları belirlenmiştir. Uygulanmış olan potansiyodinamik korozyon testleri malzemelerin korozyon hızlarını belirlemede en hassas yöntem olduğu için tercih edilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Potansiyodinamik yöntem ile %3,5 NaCl ortamında -2000 mV ile -300 mV arasında potansiyel taraması yapılan numunelerde akımda meydana gelen değişimler Şekil 3’de verilen polarizasyon eğrilerinde görülmektedir. Şekilde görülen tüm polarizasyon eğrilerinde oklar ile belirtildiği gibi alttaki eğri -2000 mV potansiyelden -300 mV potansiyele gidiş, üstteki eğri ise tekrar -2000 mV potansiyele dönüş yönüdür. Dolayısıyla dönüş taramasında akım değerleri gidiş taramasına göre bir miktar daha yüksektir. Akımdaki bu yükselme tüm numunelerde iyi bir pasifleşme olmadığını, uygulanan potansiyel ile yüzeyde farklı hızlarda korozyon gerçekleştiğini göstermektedir. Alüminyum alaşımları ve alüminyum esaslı kompozit malzemelerin korozyon davranışları ile ilgili yapılan çalışmalarda özellikle saf alüminyumda yüzeyde oluşan sürekli ve yüzeye iyi yapışkan kararlı oksit filminin korozyona karşı bariyer gibi davranarak korozyonu önlediği veya korozyon hızını yavaşlattığı bilinmektedir. Çeşitli seramik esaslı takviyeler içeren alüminyum esaslı kompozit malzemelerde ise takviye elemanları pasif filmin sürekliliğini olumsuz yönde etkilemekte ve pasif film özellikle de saldırgan klor iyonları içeren tuzlu su ortamlarında kararlı bir davranış gösterememektedir. Bütün numunelerde -2000 mV potansiyel değerinden yaklaşık -600 mV potansiyel değerine kadar akım çok düşük seviyelerdedir yani malzeme katodik davranış göstermektedir. Yaklaşık -600 mV potansiyel değerinden pozitif yöne doğru ilerledikçe akımda ani artış izlenmekte, anodik davranış başlamaktadır. Buna göre tüm kompozit numunelerde yaklaşık -600 mV potansiyel değerinden daha pozitif yöndeki potansiyellerde kompozit malzeme yüzeyinde korozyon oluşmaya başlamaktadır.

Şekil 3’de verilen potansiyodinamik polarizasyon eğrilerine göre malzemenin korozyona zorlandığı en yüksek potansiyel olan -300 mV potansiyelde, tozların 1 saat karıştırılması ile elde edilen numunede akım değeri 3 mA seviyelerinde iken, tozların farklı sürelerde mekanik alaşımlanması ile elde edilen diğer numunelerde bu değer 40-50 mA seviyelerinde olmuştur. Malzemenin daha pozitif yönde potansiyel değerlerinde düşük akım değerleri göstermesi korozyona karşı daha dayanımlı olduğunun bir göstergesidir. Buna göre 1 saat KR ile üretilen Al-%10 B₄C kompozit numune, farklı sürelerde MA yapılmış diğer kompozit numunelere göre daha iyi korozyon dayanımı sergilemektedir.

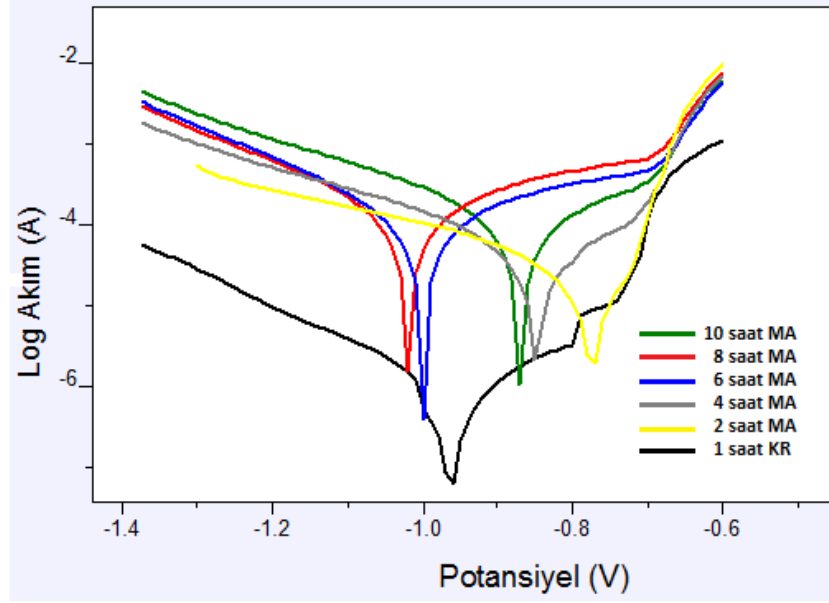
BOR KARBÜR TAKVİYELİ ALUMİNYUM ESASLI KOMPOZİT MALZEMELERİN TUZLU ORTAMDA KOROZYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ



Şekil 3. (a)1 saat KR, (b)2 saat MA, (c)4 saat MA, (d)6 saat MA, (e)8 saat MA, (f)10 saat MA yapılan TM kompozit numunelerin %3,5 NaCl çözeltisinde potansiyel-akım değişimleri

KR veya farklı sürelerde MA yapılarak üretilen bor karbür takviyeli alüminyum esaslı kompozit numunelerin Tafel polarizasyon eğrileri Şekil 4'de verilmektedir.

K. KARACİF, H. KARABULUT, R. ÇITAK



Şekil 4. KR ve farklı sürelerde MA yapılan Al-%10 B₄C kompozit malzemelerin %3,5 NaCl ortamında Tafel polarizasyon eğrileri

Kompozit numunelerin Tafel polarizasyon eğrilerinden elde edilen korozyon potansiyeli, korozyon akımı, korozyon hızı gibi elektrokimyasal veriler Tablo 2’de görülmektedir.

Tablo 2. KR veya farklı sürelerde MA yapılan Al-%10 B₄C kompozit malzemelerin %3,5 NaCl ortamında elde edilen korozyon verileri

KR / MA Süresi	Korozyon Potansiyeli (mV)	Korozyon Akımı (A)	Korozyon Hızı (mm/y)
1 saat KR	-960	$7,64 \cdot 10^{-7}$	0,008
2 saat MA	-781	$3,66 \cdot 10^{-5}$	0,399
4 saat MA	-831	$3,44 \cdot 10^{-5}$	0,376
6 saat MA	-1003	$8,31 \cdot 10^{-5}$	0,906
8 saat MA	-1024	$9,26 \cdot 10^{-5}$	1,011
10 saat MA	-850	$9,54 \cdot 10^{-5}$	1,041

Tafel polarizasyon eğrilerinden kompozit numunelerin korozyon potansiyelleri, korozyon akımları ve korozyon hızları hassas bir şekilde belirlenebilmektedir. Tafel polarizasyon eğrilerinde ve bu eğrilerden elde edilen değerler ile oluşturulan çizelgede görüldüğü gibi alüminyum matris tozları ve bor karbür takviye elemanı tozlarının 1 saat karıştırılması ile üretilen kompozit malzeme en düşük korozyon akımı ve en düşük korozyon hızına sahiptir. MA süresinin artması ile birlikte kompozit numunelerin korozyon akımları ve korozyon hızları da artmakta, böylece korozyon dayanımları azalmaktadır. Tozların 1 saat KR ile üretilen kompozit numunede korozyon hızı 0,008 mm/yıl iken, 2 ve 4 saat MA yapılan numunede yaklaşık 0,4 mm/yıl, 6 saat, 8 saat ve 10 saat MA yapılan numunede korozyon hızı 0,9-1,0 mm/yıl seviyelerine çıkmaktadır. Buna göre 2 ve 4 saat MA ile üretilen numunelerde korozyon hızı birbirine yakın değerlerde olmuş, 4 saatin üzerindeki MA sürelerinde ise numunelerin korozyon hızlarında önemli bir artış olmuştur. Bor karbür takviye elemanının yüzeyde oluşan pasif filmi olumsuz etkilemesi ve film sürekliliğini bozması, matris malzemesi ile galvanik çift oluşturması, çeşitli intermetalik bileşikler oluşturması yoluyla alüminyum esaslı kompozitin korozyon dayanımını azalttığı belirtilmişti. Literatüre göre bor karbür takviye oranı arttıkça alüminyum kompozitin korozyon dayanımı azalmaktadır [11-20]. Aynı oranda bor karbür takviye içeren fakat karıştırma veya farklı sürelerde MA yapılan alüminyum esaslı kompozitlerde MA süresinin artması ile kompozit malzemenin korozyon dayanımının azalmasında malzemenin yapısal özelliklerinin etkili olduğu düşünülmektedir. Uygulanan KR veya MA süresi işlem sonrası elde edilen takviye matris toz karışımının yapısal özelliklerini etkilemekte, farklı özellikteki tozlara

BOR KARBÜR TAKVİYELİ ALUMİNYUM ESASLI KOMPOZİT MALZEMELERİN TUZLU ORTAMDA KOROZYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

uygulanan presleme ve sinterleme işleminin de farklı yapısal ve mekanik özellikler oluşturduğu düşünülmektedir. Toz metalurjisinde genel olarak, MA süresinin artması ile takviye ve matris tozlarının birbirleriyle, bilyelerle, karıştırıcı kollarla, atritör iç yüzeyleri ile çarpışması sonucu artan deformasyon ve pekleşmenin sonucunda oluşan kırılma mekanizmasıyla toz tane boyutları giderek küçüldüğü [11, 24-26], küçük tozların ve iç yapılarında gözenek bulunan tozların sıkıştırmaya direnç göstermesi ile yoğunlukların düştüğü [27] ve buna bağlı olarak malzemelerde gözenek gibi hataların ortaya çıkabildiği düşünülmektedir. Buna göre, küçük toz tane boyutu nedeniyle tane sınırlarının ve tane sınırı toplam yüzey alanının fazlalığı, deformasyon sertleşmesi nedeniyle gözenekler gibi presleme hatalarının artışı sonucunda kompozit malzemenin korozyon hızının arttığı ve korozyon dayanımının azaldığı düşünülmektedir.

Toz metalurjisi yöntemi ile kompozit malzeme üretiminde yapı elemanlarının istenilen homojenlikte karışması ve uygun toz boyutu için yapılan MA işleminde sürenin fazla olması durumunda malzemenin korozyon dayanımının olumsuz yönde etkilendiği görülmüştür. Bu nedenle kullanılacak kompozit malzemenin çalışma şartları dikkate alınarak, istenilen mekanik özelliklerin ve korozyon dayanımı gibi istenilen fizikokimyasal özelliklerin elde edilebileceği optimum MA süresi belirlenmelidir.

4. SONUÇLAR

Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen %10 B₄C ile güçlendirilmiş alüminyum esaslı kompozitlerin tuzlu ortamda (%3,5 NaCl) elektrokimyasal korozyon davranışlarının incelendiği bu çalışmada aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Kompozit numunelere uygulanan anodik yöndeki potansiyelerde malzeme yüzeyinde bir pasifleşme olmayıp, farklı şiddetlerde korozyon gerçekleşmiştir. Bu durum bor karbür takviye elemanının yüzeyde oluşan pasif filmi olumsuz etkilemesine atfedilmektedir.
2. Kompozit yapısında bulunan bor karbür takviye elemanının alüminyum matris ile galvanik çift oluşturması da kompozitin korozyon hızını artırmaktadır.
3. En iyi korozyon dayanımı ana malzeme ve takviye malzeme tozlarının 1 saat karıştırılması ile üretilen kompozit numunede, en zayıf korozyon dayanımı ise 10 saat mekanik alaşımlama ile üretilen kompozit numunede elde edilmiştir. Mekanik alaşımlama yönteminde, numunelere uygulanan mekanik alaşımlama süresinin artması ile özellikle 4 saatten sonra numunelerdeki korozyon hızının arttığı tespit edilmiştir.
4. Mekanik alaşımlama süresinin fazla olması durumunda korozyon dayanımının azalmasında toz tane boyutunun küçülmesi nedeniyle korozyona karşı daha hassas olan tane sınırlarının ve tane sınırları yüzey alanının artması, deformasyon sertleşmesi nedeniyle gözenek gibi presleme hatalarının artmasının etkili olduğu düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Proje desteği için Gazi Üniversitesi BAP Birimine teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] RIAHI, A.R., ALPAS, A.T., "The role of tribo-layers on the sliding wear behavior of graphitic aluminum matrix composites", *Wear*, 251, 1396-1407, 2001.
- [2] JUN D., LIU, Y.H., YU, S.R., LI, W.F., "Dry sliding friction and wear properties of Al₂O₃ and carbon short fibres reinforced Al-12Si alloy hybrid composites", *Wear*, 257, 930-940, 2004.
- [3] PARDO, A., MERINO, M.C., MERINO, S., VIEJO, F., CARBONERAS, M., ARRABAL, R., "Influence of reinforcement proportion and matrix composition on pitting corrosion behavior of cast aluminum matrix composites (A3xx.x/SiCp)", *Corrosion Science*, 47, 1750-1764, 2005.
- [4] DE SALAZAR, J.M.G., URENA, A., MANZANEDO, S., BARRENA, M.I., "Corrosion behavior of AA5950 and AA6994 reinforced with Al₂O₃ particles in aerated %3.5 chloride solutions: potentiodynamic measurements and microstructure evaluation", *Corrosion Science*, 41, 529-545, 1999.
- [5] HU, J., CHU, W.Y., FEI, W.D., ZHAO, L.C., "Effect of interfacial reaction on corrosion behavior of alumina borate whisker reinforced 6061 Al composite", *Materials Science and Engineering A*, 374, 153-159, 2004.

K. KARACİF, H. KARABULUT, R. ÇITAK

- [6] SARASWATHI, Y.L., DAS, S., MONDAL, D.P., "Influence of microstructure and experimental parameters on the erosion-corrosion behavior of Al alloy composites", *Materials Science and Engineering A*, 425, 244-254, 2006.
- [7] DOBRZANSKI, L.A., WLODARCZYK, A., ADAMIAK, M., "Structure, properties and corrosion resistance of PM composite materials based on EN AW-2124 aluminum alloy reinforced With The Al₂O₃ Ceramic Particles", *Journal of Materials Processing Technology*, 162, 27-32, 2005.
- [8] QIAO, Y., QU, L., ZHANG, X., ZHANG, H., "Boron carbide composite ceramic preparation and corrosion behavior in simulated seawater", *Ceramics International*, 41, 5026-5031, 2015.
- [9] KATKAR, V.A., GUNASEKARAN, G., RAO, A.G., KOLI, P.M., "Effect of the reinforced boron carbide particulate content of AA6061 alloy on formation of the passive film in seawater", *Corrosion Science*, 53, 2700-2712, 2011.
- [10] HAN, Y.M., GALLANT, D., CHEN, X.G., "Galvanic corrosion associated with Al-B₄C composites/SS304 and Al-B₄C composites/AA6061 couples in NaCl and H₃BO₃ solutions", *Electrochimica Acta*, 94, 134-142, 2013.
- [11] SURYANARAYANA, C., "Mechanical Alloying And Milling", *Progress in Materials Science*, 46, 1-184, 2001.
- [12] TOPTAN, F., ALVES, A.C., KERTI, I., ARIZA, E., ROCHA, L.A., "Corrosion and tribocorrosion behaviour of Al-Si-Cu-Mg alloy and its composites reinforced with B₄C particles in 0.05M NaCl solution", *Wear*, 306, 27-35, 2013.
- [13] HAN, Y.M., GALLANT, D., CHEN, X.G., "Corrosion inhibition of Al-B₄C metal matrix composites in a NaCl solution by benzotriazole", *Materials Chemistry and Physics*, 139, 187-195, 2013.
- [14] FRANKEL, G.S., "Pitting corrosion of metals; a summary of the critical factors", *Journal of Electrochemical Society*, 145, 2186-2198, 1998.
- [15] XUE, W., WU, X., LI, W., TIAN, H., "Anti-corrosion film on 2024/SiC aluminum matrix composite fabricated by microarc oxidation in silicate electrolyte", *Journal of Alloys Compounds*, 425, 302-306, 2006.
- [16] MONTOYA-DÁVILA, M., PECH-CANUL, M.I., PECH-CANUL, M.A., "Effect of SiCp multimodal distribution on pitting behavior of Al/SiCp composites prepared by reactive infiltration", *Powder Technology*, 195, 196-202, 2009.
- [17] FENG, Z., LIN, C., "Pitting behavior of SiCp/2024 Al metal matrix composites", *Journal of Materials Science*, 33, 5637-5642, 1998.
- [18] ZHANG, Z., CHEN, X.G., CHARETTE, A., "Fluidity and microstructure of an Al-10% B₄C composite", *Journal of Materials Science*, 44, 492-501, 2009.
- [19] ZHANG, Z., FORTIN, K., CHARETTE, A., CHEN, X.G., "Effect of titanium on microstructure and fluidity of Al-B₄C composites", *Journal of Materials Science*, 46, 3176-3185, 2011.
- [20] HAN, Y., GALLANT, D., CHEN, X.G., "Investigation on corrosion behavior of the Al-B₄C metal matrix composite in a mildly oxidizing aqueous environment", *Corrosion*, 67, 115005-11, 2011.
- [21] SHOROWORDI, K.M., LAOUI, T., HASEEB, A.S.M.A., CELIS, J.P., FROYEN, L., "Microstructure and interface characteristics of B₄C, SiC and Al₂O₃ reinforced Al matrix composites: a comparative study", *Journal of Materials Processing Technology* 142, 738-743, 2003.
- [22] KERTI, I., TOPTAN, F., "Microstructural variations in cast B₄C-reinforced aluminium matrix composites (AMCs)", *Materials Letters* 62, 1215-1218, 2008.
- [23] BARADESWARAN, A., PERUMAL, A. E., "Influence of B₄C on the tribological and mechanical properties of Al 7075-B₄C composites", *Composites: Part B* 54, 146-152, 2013.
- [24] KARABULUT, H., ÇITAK, R., ÇİNİCİ, H., "Mekanik Alaşımına Süresinin Al + % 10 Al₂O₃ Kompozitlerde Eğme Dayanımına Etkisi", *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 28: 3, 635-643, 2013.
- [25] LEE, W., KWUN, S. I., "The effects of process control agents on mechanical alloying mechanisms in the Ti-Al system", *Journal of Alloys and Compounds*, 240: 193-199, 1996.
- [26] ARIK, H., TÜRKER, M., "Production and characterization of in situ Fe-Fe₃C composite produced by mechanical alloying", *Materials & Design*, 28: 140-146, 2005.
- [27] SARITAŞ, S., TÜRKER, M. DURLU, N., "Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri", *Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları*:05, Ankara, 2007.